

УДК 669:628.16.06

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ В РУЛОННОМ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОМ МОДУЛЕ

А. Н. Тумин, аспирант кафедры прикладной гидромеханики
Государственное высшее учебное заведение «Донбасский горно металлургический университет», г. Алчевск, Украина, e-mail: a_tumin@mail.ru

Аннотация: При выборе типа мембранного модуля для условий очистки воды посредством мембранных технологий большое значение имеют гидродинамические характеристики ее потока в напорном канале модуля. Правильный выбор конструкции последнего обеспечивает достижение оптимальной эффективности работы всей ультрафильтрационной установки, что возможно только после проведения, в первую очередь, детальных теоретических исследований собственно процесса очистки воды в напорном канале модуля с целью определения наиболее рационального режима работы выбранной установки. В данной работе представлено теоретическое исследование характера течения воды в разделительном (напорном) канале рулонного ультрафильтрационного модуля (РУФМ), рассмотрен режим течения воды и отмечена важность роли скоростей потока воды и фильтрации в нем на примере гидродинамических очистителей, определены дальнейшие пути исследований.

Ключевые слова: вода, ультрафильтрация, рулонный модуль, касательное напряжение.

THEORETICAL RESEARCH OF WATER FLOW CHARACTER INSIDE A ROLL ULTRAFILTRATION MODULE

A.N. Tumin, graduate student, Department of Applied Hydromechanics.
State High Educational Institution "Donbas Mining Metallurgical University", Alchevsk, Ukraine, e-mail: a_tumin@mail.ru

Annotation. While choosing the type of membrane module for conditions of water treatment by membrane technologies a great value of importance goes to hydrodynamic characteristics of its stream in flow channel of module. The right choice of construction will provide optimal effectiveness of the whole ultrafiltration installation's work that is on possible after precise theoretical research on the process of water treatment in flow channel of module in order to find the most rational work regime of the installation. This work presents theoretical research of water's flow character in separating (streaming) channel of roll ultrafiltration module (RUFM). The work also includes examination of water flow regime and it admits the importance of water flow rates and filtration in it on example of hydrodynamic cleaners, the further paths for researches also were defined.

Keywords: water, ultrafiltration, roll module, tangential stress.

Введение. Очистка воды методом ультрафильтрации известна с 70 годов прошлого столетия. За последние 4 десятилетия развития данной технологии многое изменилось, как в стоимостном плане, так и в плане её технической реализации. В Украине установки ультрафильтрации воды наибольшее применение получили в металлургической, химической, пищевой, сельскохозяйственной отраслях промышленности. Рост спроса на них вызван неудовлетворительным качеством воды, получаемой методами традиционной ее очистки. Используемые в модулях этих установок ультрафильтрационные мембраны имеют поры размером от 5 нм до 0,1 мкм и, по сути, являются 100 процентным барьером для коллоидных частиц, бактерий и вирусов. Ультрафильтрационные установки состоят из мембранных модулей, которые могут быть трубчатого, капиллярного и рулонного исполнения. В данном случае речь пойдет о последнем исполнении. Основным недостатком таких модулей является появление на поверхности мембраны в ходе очистки слоя осадка, который постепенно уплотняется и перерастает в гель слой. Это в свою очередь отрицательно сказывается на процессе фильтрации воды. Многими зарубежными и отечественными авторами были предприняты многочисленные попытки воздействия, как на сам слой, так и на условия его образования. Наибольшее распространение в этом вопросе получили в основном следующие направления исследований: повышение скорости транзитного потока в напорном канале; использование в напорном канале всевозможных конструкций турбулизаторов потока; воздействие на процесс разделения ультразвуком; усовершенствование средств предварительной очистки воды; разработка новых типов мембран. В данном случае это касается плоских мембран, используемых в РУФМ.

Цель работы. Теоретическое исследование характера потока воды в напорном канале РУФМ, работающего в режиме тупиковой фильтрации «снаружи во внутрь» и с периодическими прямыми промывками очищаемой водой и обратными промывками фильтратом в случаях потребности в них.

Материал и результаты исследований. Рассмотрим более детально описываемый в работе [1] РУФМ со следующими техническими параметрами: высота напорного канала $\delta = 0,6$ мм; площадь проницаемой поверхности 2-х мембран $S = 40$ м²; площадь поперечного сечения напорного канала $S_k = 0,0114$ м²; производительность по фильтрату $Q_f = 4$ м³/час; объем корпуса – 30 л.

Для дальнейшего анализа данной конструкции определим еще ряд параметров.

При известной площади поперечного сечения прямоугольного напорного канала S_k и высоте δ , находим его ширину b (см. рис. 1) из выражения:

$$b = \frac{S_k}{\delta} \quad (1)$$

Из условия, что площадь проницаемой поверхности 2-х мембран равна:

$$S = (b \times L) \times 2 \quad (2)$$

определяем длину напорного канала:

$$L = \frac{S}{2 \times b} \quad (3)$$

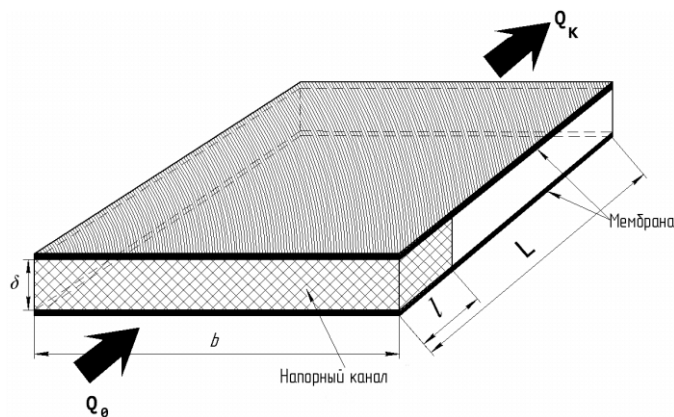


Рисунок 1 – Схема для определения геометрических размеров пакета мембран РУФМ

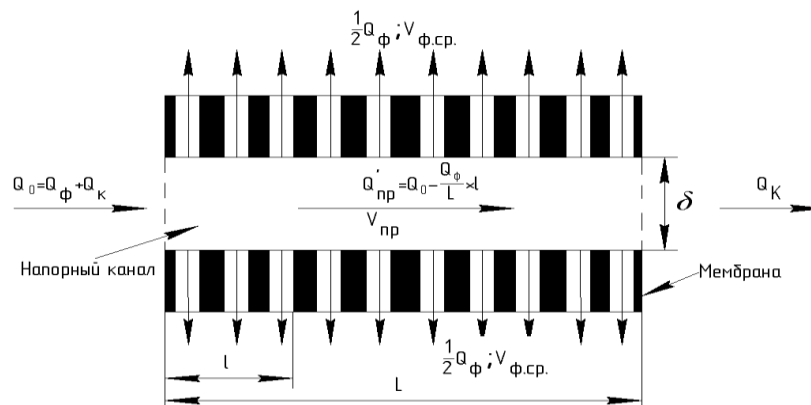


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения расхода по длине напорного канала РУФМ

Исследования характера течения проведем для наиболее тяжелого режима работы РУФМ – режима тупиковой очистки.

При известной общей производительности модуля по фильтрату находим усредненную скорость фильтрации по всей проницаемой поверхности мембран:

$$V_{\phi,cp} = \frac{Q_{\phi}}{(b \times L) \times 2} \quad (4)$$

Определим выход фильтрата по длине напорного канала с учетом (4):

$$\Delta Q_{\phi} = 2 \times (b \times l) \times V_{\phi,cp} = \frac{Q_{\phi}}{L} \times l \quad (5)$$

где l - текущая длина напорного канала, изменяющаяся от 0 до L .

Находим текущий продольный расход воды по длине напорного канала с учетом выхода фильтрата (см. рис. 2):

$$Q'_{np} = Q_0 - \Delta Q_{\phi} = Q_0 - \frac{Q_{\phi}}{L} \times l \quad (6)$$

где Q_0 - расход воды на входе модуля (в режиме тупиковой очистке $Q_0 = Q_{\phi}$).

Зная продольный расход воды, изменяющийся по длине напорного канала, определяем среднюю продольную скорость воды в его произвольном поперечном сечении:

$$V'_{np} = \frac{Q'_{np}}{S_k} = \frac{Q'_{np}}{b \times \delta} \quad (7)$$

Если признать, что в ходе тупиковой очистки используется периодически прямая очистка очищаемой водой мембран и канала, то, на наш взгляд, для оценки результатов следует ориентироваться на опыт использования неполнопоточных гидродинамических очистителей (НГДО) для тонкой очистки воды. Так, в НГДО существует оценочный параметр $i = V'_{np} / V_{\phi}$, характеризующий работоспособность и надежность их работы.

Если скорость воды в конце канала неидеальных очистителей минимальная, то они работоспособны только в том случае, если значение отношения этой скорости V_{np} к скорости фильтрации V_{ϕ} будет равно значению, отвечающему очистке конкретной очищаемой жидкости или группе жидкостей и предварительно установленному опытным путем [2].

Опытами установлено [3], что в случае очистки потока технической воды от твердых загрязнений в НГДО в зависимости от степени ее загрязненности и ряда других факторов значение « i » лежит в пределах от 3 до 12. При этом следует отметить, что эти значения получены из условий, что скорость фильтрации определялась по живому сечению проницаемой поверхности, а не на единицу ее площади, как это имеет место в мембранных модулях. В связи с этим упоминаемые значения отношений скоростей в НГДО будут в несколько раз большими, но сам факт особой важности этого параметра остается.

Известно, что каждая мембрана характеризуется удельной производительностью ($м^3 / м^2 \cdot час$) или ($м^3 / 3600 м^2 \cdot сек$), то есть, по сути, это скорость фильтрации ($м / 3600 \cdot сек$) через единицу поверхности рабочей части мембраны. Поэтому очевидно, что для мембранных устройств отношение « i » упоминаемых выше скоростей будет иметь значение на несколько порядков большее, чем в гидродинамических очистителях. Но важность этого параметра и в мембранных устройствах неоспорима.

Известно и то, что при расчете мембранных модулей используется и отношение $q = V_n / V_k$, что означает отношение скорости воды в начале и конце напорного канала.

Но, на наш взгляд, для мембранных устройств, как отношение « i », так и отношение « q », не могут быть достаточно объективными, так как параметр скорости в знаменателе в ходе очистки постепенно изменяется. В НГДО он постоянен, так как проницаемая поверхность не засоряется.

Известно и то, что в последние годы возрос интерес к использованию тупикового режима очистки воды в мембранных аппаратах. В связи с этим, на наш взгляд, появилась потребность в более глубоких знаниях процессов, имеющих место в напорном канале РУФМ.

Для наглядности построим график изменения отношения скоростей « i » по длине напорного канала РУФМ, где $l' = l / L$ – относительная длина напорного канала.

Из рисунка 3 очевидно, что значения отношения « i » в напорном канале РУФМ существенно отличаются от значений отношения « i » в НГДО. Это характеризует особенность процесса очистки воды в рулонном модуле и требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований с целью определения оптимального значения « i ».

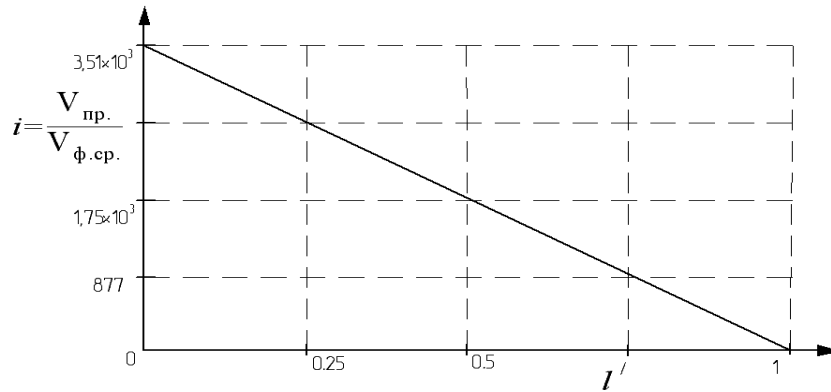


Рисунок 3 – График изменения отношения «i» скоростей по длине напорного канала РУФМ при тупиковой фильтрации

На рисунке 4 представлен график изменения средней продольной скорости потока в напорном канале, из которого очевидно, что она носит непостоянный характер по длине напорного канала рулонного УФ модуля. Поэтому представляет интерес изучение вопроса стабилизации значения величины средней продольной скорости и ее влияние на процесс образования гель слоя и на его разрушение.

В работах ряда исследователей [4-6] встречаются предположения о влиянии касательных напряжений, создаваемых потоком очищаемой воды, на образование гель слоя на поверхности мембран. Для исследуемого РУФМ построим эпюры касательных напряжений по длине напорного канала при тупиковой фильтрации. Для чего предварительно определим перепад давления в напорном канале РУФМ на участке длиной l [7]:

$$V'_{np} = \frac{\Delta p' \times \delta^2}{12 \times \mu \times l}, \quad (8)$$

$$\Delta p' = \frac{V'_{np}}{0,083 \times \delta^2} \times \mu \times l, \quad (9)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости.

По известному перепаду давления определим значения касательных напряжений [7]:

$$\tau = \frac{\Delta p'}{l} \times y, \quad (10)$$

где y - высота напорного канала изменяющаяся от 0 до $\frac{\delta}{2}$.

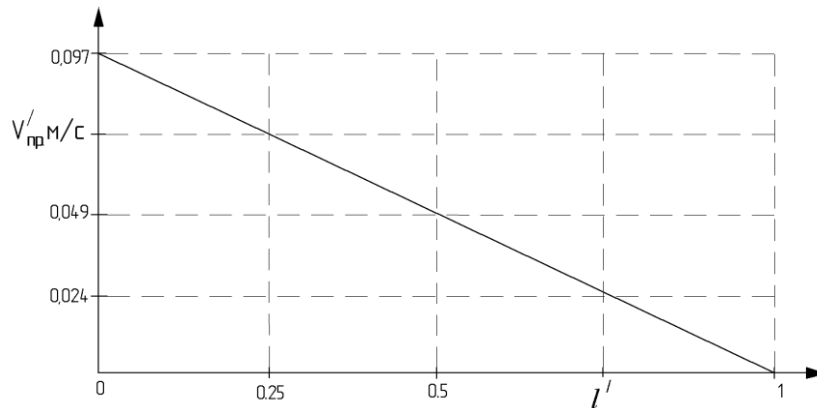


Рисунок 4 –Изменение средней продольной скорости по длине напорного канала РУФМ при тупиковой фильтрации

На рисунке 5 представлены эпюры касательных напряжений для ряда сечений напорного канала (τ_1 - эпюра касательных напряжений при длине напорного канала 100 мм; τ_2 - эпюра касательных напряжений при длине 300 мм; τ_3 - эпюра касательных напряжений при длине 700 мм; τ_4 - эпюра касательных напряжений при длине 900 мм; τ эпюра касательных напряжений при $Q_{\phi} = 0$). Из этого рисунка видно, что величина касательных напряжений уменьшается вследствие снижения текущего значения продольной скорости. При прямой промывке, когда $Q_{\phi} = 0$, значения касательных напряжений τ по длине напорного канала будут постоянными.

На рисунке 6 представлен график изменения величины касательных напряжений τ на поверхности мембран по длине напорного канала РУФМ при тупиковой фильтрации.

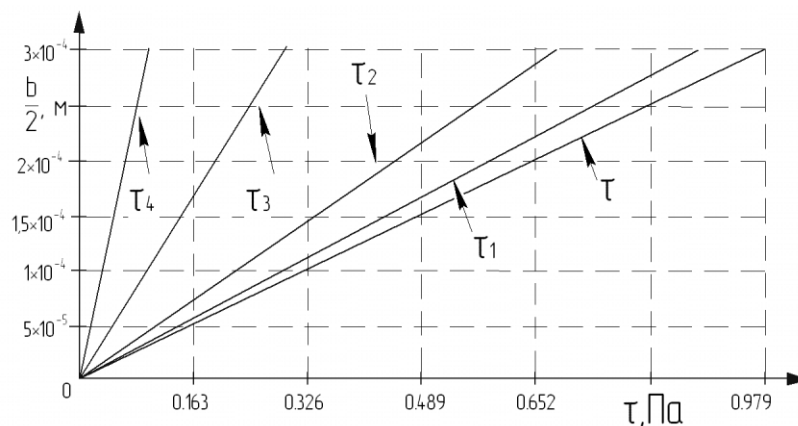


Рисунок 5 - Эпюры касательных напряжений для разных участков длины напорного канала РУФМ

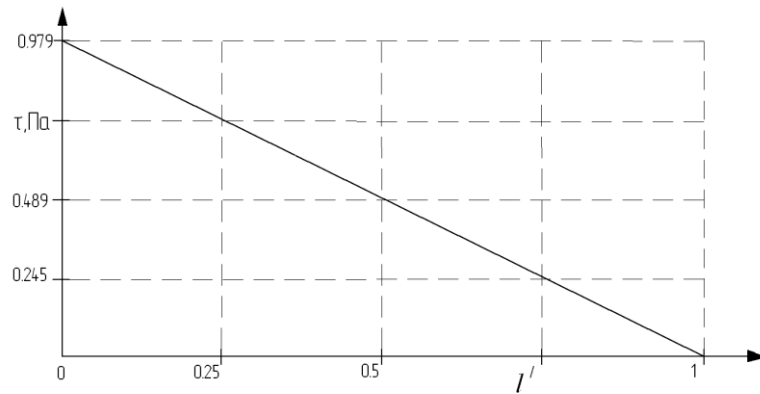


Рисунок 6 – Изменение величины касательных напряжений по длине напорного канала РУФМ при тупиковой фильтрации

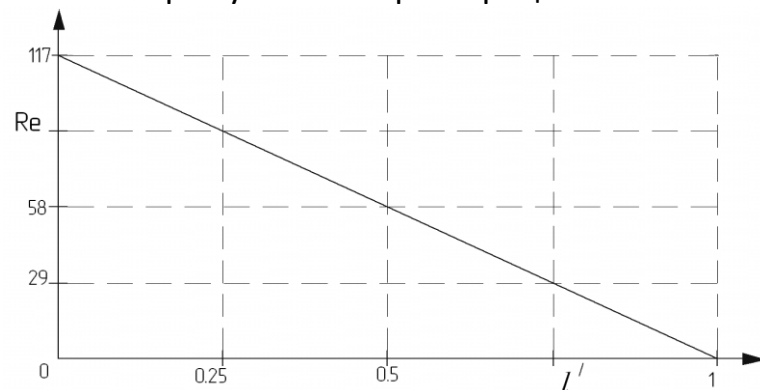


Рисунок 7 – Изменение числа Рейнольдса вдоль напорного канала РУФМ при тупиковой фильтрации

Для определения характера течения очищаемой воды в напорном канале при тупиковой фильтрации, вычислим значение числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{V'_{np} \times d_{\vartheta}}{\nu}, \quad (11)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости.

Находим эквивалентный диаметр, соответствующий напорному каналу:

$$d_{\vartheta} = 4 \times R_2 = 2 \times \delta, \quad (12)$$

где R_2 – гидравлический радиус.

На рисунке 7 представлен график изменения числа Рейнольдса вдоль напорного канала РУФМ.

Из рисунка 7 видно, что режим течения воды носит ламинарный характер, что вместе с постепенным уменьшением числа Рейнольдса вдоль напорного канала в случае тупиковой фильтрации свидетельствует о существовании всех предпосылок для появления концентрационной поляризации [8]. Известно, что изменением конструкции напорных каналов путем вставки в них различного рода турбулизаторов удаётся повысить напряжение жидкостного трения, тем самым снизить влияние концентрационной поляризации. Но авторы работы [1] более склонны к тому, что наличие сетки - турбулизатора в напорном канале РУФМ является главным его недостатком, объясняя это тем, что вследствие этого в напорном канале образуются застойные зоны, в которых происходит осаждение частиц загрязнений.

В связи с этим представляет интерес и знание влияния величины касательных напряжений, создаваемых потоком очищаемой воды, в напорных каналах без турбулизаторов различных конструкций модулей. Обычно их называют модулями с «открытым напорным каналом». Зная критическое значение касательного напряжения, при котором происходит удаление осадка с поверхности мембран, можно определить количество жидкости, которое необходимо подать на вход модуля для предотвращения появления концентрационной поляризации.

Выводы.

1. РУФМ давно признаны оптимальной конструкцией в технологическом и конструкционном плане, благодаря большой удельной поверхности мембран и низкой материалоемкости. Её недостаток состоит в наличии в напорном канале турбулизатора в виде сетки [1], которая способствует образованию застойных зон, являющимися ловушками для частиц загрязнений и центрами концентрационной поляризации, а также создает дополнительное гидравлическое сопротивление потоку воды.

2. Необходимо продолжить исследования влияния величины касательных напряжений на процесс очистки проницаемой поверхности мембран РУФМ, определить минимально допустимое ее значение, что позволит снизить вероятность образования гелевого слоя.

3. Необходимо также исследовать динамику осаждения частичек загрязнений на поверхности мембран с учетом изменений рабочих параметров мембранного модуля: давления в канале, скорости фильтрации, скорости продольного потока и др.

4. Из представленных выше графиков очевидно, что рассматриваемый авторами работы [1] режим тупиковой очистки воды с прямой промывкой в «открытом напорном канале» заслуживает внимания, но не в полной мере решает вопрос загрязнения мембран, так как в этом случае за

тот же отрезок времени имеет место только сокращение длины засоряемой их части. Поэтому представляет интерес использования «открытого напорного канала» в режиме непрерывного сброса части потока, особенно в режиме с использованием его части для циркуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тенденции водоподготовки с применением мембранных технологий : материалы III научно-практической конференции [«Современные технологии водоподготовки и защиты оборудования от коррозии и накипеобразования»] , Андрианов А. П., Первов А. Г., д.т.н., Юрчевский Е. Б., Москва, сентябрь 2009г.

2. Чебан В.Г. Практический расчет фильтроэлемента с грушеобразным профилем фильтрующей поверхности очистителя маловязких жидкостей // Сборник научных трудов ДонГТУ. Вып. 31. – Алчевск:ДонГТУ, 2010. – С.115-126.

3. Пат. 64598 Україна, МПК6 B01D37/00. Спосіб очищення рідин від механічних домішок у потоці / Бондаренко В.П.; заявник і патентовласник Бондаренко В.П. – №2003076535; заявл. 14.07.03; опубл. 15.07.05. Бюл. № 7.

4. Поляков Ю. С. Ультра- и микрофльтрация в полволоконных аппаратах с образованием осадка на поверхности мембран : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : / Поляков Юрий Сергеевич.-К., 2005.- 150 с.

5. Ripperger S., Altmann J. Crossflow Microfiltration – State of the Art // Separation and Purification Technol., 2002, V. 26, No. 1, P. 19–31.

6. Bowen W. R., Jenner F. Theoretical descriptions of membrane filtration of colloids and fine particles: an assessment and review // Adv. Colloid Interface Sci., 1995, V. 56, P.141–200.

7. Сборник задач по машиностроительной гидравлике : Учебное пособие для вузов по машиностроительным специальностям / Ред.И. И. Куколевский, Л. Г. Подвидз. – 4-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1981 . – 464 с.

8. Дытнерский Ю.И. Обратный осмос и УФ / Ю.И. Дытнерский. – 1978. - 328с.